

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

APLICACIÓN DE DOS PROGRAMAS SIG LIBRES EN LA OBTENCIÓN DE REDES VIALES URBANAS A PARTIR DE CAPAS VECTORIALES

EDWIN ALBERTO AMADO BARÓN

Investigador independiente. Colombia

e.a.amado.baron@gmail.com

RESUMEN

A través de *gvSIG* y su extensión *Sextante*, se implementó, evaluó y documentó un método para obtener redes viales urbanas bidimensionales a partir de capas vectoriales, con base en la interpolación por vecino más cercano (IVC). La eficiencia del método fue comparada con la obtenida a través de la digitalización manual de la red, en cuatro zonas de prueba, por medio de dos sistemas operativos privativos (*Windows*) y cuatro libres (*GNU/Linux*). Como aplicación, el método propuesto se utilizó para construir la red vial en un sector de Montevideo. Se detectaron cuatro tipos de errores, dos evitables y dos inherentes al método. El mejor rendimiento del método desarrollado se obtuvo en el sistema operativo *Linux Mint*. El método permite obtener resultados satisfactorios, aunque aún es menos eficiente que la digitalización manual optimizada; su funcionamiento puede mejorarse incorporando la extensión para topología de *gvSIG*.

Palabras clave: aplicación, *software* libre, SIG, redes viales, interpolación por vecino más cercano.

APPLICATION OF FREE GIS SOFTWARE TO OBTAIN URBAN ROAD NETWORKS BASED ON VECTOR LAYERS

ABSTRACT

Based on nearest neighbor interpolation (NNI), a method to obtain 2D urban road networks using *gvSIG* and its plugin *Sextante*, was developed, evaluated and documented. Efficiency of proposed method was compared with handmade digitalization in four test zones, utilizing two non-free operative systems (*Windows*) and four free operative systems (*GNU/Linux*). The proposed method was used to build the road network in a zone of Montevideo. Four types of errors were detected: two of them can be avoided and two are inherent to NNI method. The best performance of the method exposed occurred in the operative system *Linux Mint*. NNI method is functional, though

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

it is less efficient than handmade digitalization; performance of NNI method can be improved using topology plugin for *gvSIG*.

Keywords: application, free software, GIS, road networks, nearest neighbor interpolation.

1. Introducción

Entre las innumerables aplicaciones que tienen actualmente los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se encuentra el análisis de redes; entre otras, este campo incluye las redes viales. La importancia concedida al análisis de redes viales ha llevado a la creación de programas específicos para su tratamiento, como *TransCad* (Caliper, 2010), *RoutingMaps* (Rodríguez, 2007) y la extensión para *ArcGIS*, *Network Analyst* (Barrientos, 2007), entre los programas privativos, y las extensiones desarrolladas para *gvSIG*, tanto no oficiales (Ubeda, 2008) como oficiales (*gvSIG*, 2009), entre los programas libres. Desde luego, cualquier análisis de redes viales requiere una capa vectorial de tipo línea que contenga los ejes de la red.

En la actualidad existen proyectos muy importantes para generar cartografía digital, incluidas las redes viales, mediante la participación de comunidades de voluntarios alrededor del mundo, como es el caso de *Google Maps* (Google, 2010) y *OpenStreetMap* (OSM, 2010). No obstante, ambos proyectos presentan importantes limitaciones de cobertura en poblaciones pequeñas e intermedias.

Por otro lado, en la última década se han venido desarrollando una amplia variedad de métodos para obtener redes viales a partir de capas ráster en diferentes formatos: mapas escaneados (Gold y Snoeyink, s.f.); imágenes satelitales de alta resolución espacial, como *QuickBird* (Wang *et al.*, s.f.), *Ikonos* (Zhang y Couloigner, 2006) y *SPOT* (Roux *et al.*, s.f.); fotografías aéreas (Koutaki y Uchimura, 2003); sensores especializados, como *MOMS-2P* (Wiedemann *et al.*, s.f.), *Lidar* (Zhu y Mordohai, s.f.) y *Radar* (Amberg, 2005). Una exposición sobre las metodologías más importantes usadas para la extracción de redes viales a partir de capas ráster se puede consultar en Mena (2003) y Zanin (2004).

A pesar de su notable desarrollo, los métodos basados en capas ráster imponen tres serias limitaciones que dificultan su difusión: a) salvo algunas excepciones¹, la mayoría de los métodos citados se han desarrollado para zonas rurales; b) las imágenes de sensores especializados requeridas tienen un elevado costo y c) la teoría en que se basan es bastante específica: cálculo vectorial (Gonçalves y dal Poz, 2001), estadística avanzada (Anil y Natarajan, 2010), redes neuronales (Yuan *et al.*, s.f.), lógica difusa (Bonneton, s.f.) y, desde luego, análisis digital de imágenes avanzado (Ruskoné, 1996).

Debido a lo anterior, existen métodos que permiten usar mapas vectoriales de manzanas para obtener los ejes viales en zonas urbanas. El presente documento resume el primero de una serie de trabajos destinados a la exploración de este tipo de métodos, teniendo en cuenta dos objetivos primordiales: promover la filosofía del *software* libre y favorecer la difusión de los métodos

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, nº 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

desarrollados. Para cumplir estos objetivos se siguen cuatro principios: a) consultar y citar exclusivamente documentación disponible de forma gratuita en internet²; b) aplicar las funciones estándar disponibles en los programas SIG utilizados, sin acudir al uso de lenguajes de programación; c) dar prioridad al uso de programas libres, especialmente a los que están cubiertos por la licencia GPL; d) utilizar programas libres con licencias diferentes a la GPL, o programas privativos, solamente con fines de comparación.

A continuación, se presenta la aplicación de dos programas SIG libres en la implementación, evaluación y documentación de un método basado en la interpolación por vecino más cercano para crear redes viales urbanas planas, es decir, sin componente en altura, a partir de capas vectoriales que contengan las manzanas de la zona de interés, ya sea como líneas o como polígonos, empleando el programa libre *gvSIG* y la extensión *Sextante*.

2. Antecedentes

2.1. Programas y licencias libres

En 1985 Richard Stallman creó la *Free Software Foundation* para impulsar el desarrollo de los programas libres (Stallman, 2004: 24). A pesar de su reconocida calidad y amplia difusión, aún existen serias confusiones conceptuales sobre el *software* libre³. Un programa es libre cuando su licencia permite ejercer a cualquier usuario individual las llamadas cuatro libertades fundamentales (Stallman, 2004:19): (1) usar el programa con cualquier propósito; (2) estudiar el funcionamiento del programa y adaptarlo a las propias necesidades; (3) distribuir copias del programa y (4) mejorar el programa y publicar las mejoras. En el presente trabajo se llamará privativos a los programas que impiden ejercer cualquiera de estas cuatro libertades.

Por su parte, la licencia es un acuerdo legal mediante el cual, quien detenta los derechos, da a conocer las condiciones bajo las que se puede utilizar un programa. La primera licencia libre, creada por Richard Stallman en 1989, se conoce como licencia GNU GPL o simplemente GPL (*General Public License*). Su intención es proteger las cuatro libertades fundamentales e impedir que los programas libres sean convertidos en privativos (Stallman, 2004:206). Hoy en día existe gran variedad de licencias que se hacen llamar libres, aunque ofrecen menor protección⁴, algunas de las cuales son incluso incompatibles con la GPL.

2.2. gvSIG y Sextante

El proyecto *gvSIG* nació en 2002 cuando la Conselleria d'Infraestructures i Transport de la Generalitat Valenciana en España decidió migrar sus sistemas a *software* libre y, al no encontrar un opción acorde a sus necesidades, abrió una licitación para desarrollar un programa SIG libre, multiplataforma, compatible con los estándares de la *Open Geospatial Consortium* (OGC), escalable y fácil de usar (Carrión *et al.*, 2008). Un resumen sobre el origen y la filosofía del

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

proyecto se puede consultar en Anguix (2005). Además de la versión para equipos de escritorio y portátiles, existe una para dispositivos móviles (PDA), *gvSIG Mobile* (Montesinos y Carrasco, 2008), y otra para teléfonos móviles, *gvSIG Mini* (Agazzi, 2010). El programa *gvSIG* dispone, en sus diferentes versiones estables, de extensiones para análisis ráster y teledetección (Carrión *et al.*, 2008), visualización y edición 3D (Torres *et al.*, 2008), manipulación de tablas y edición vectorial (Estévez, *et al.*, 2009), publicación bajo estándares de la OGC (Higón y Anguix, 2009), manejo de datos LIDAR (García, 2010) y análisis de redes viales (*gvSIG*, 2009). También se están desarrollando extensiones para análisis de redes hídricas (Kareaga, 2008), correcciones topológicas (Acevedo, 2010), extracción automática de metadatos (CIT, 2008) y topografía (Soria y Brodin, 2009), entre las más importantes. Con base en la versión oficial de *gvSIG*, el *Oxford Archaeology Institute* desarrolló la versión *gvSIG OADE (Oxford Archaeology Digital Edition)*, que ya alcanzó su versión 1.0 (OAI, 2010) y se destaca por su ergonomía y estabilidad.

En 2003 la Universidad de Extremadura, con el patrocinio de la Junta de Extremadura, en España, comenzó el desarrollo de *Sextante* a partir de SAGA, otro programa SIG libre. En 2008 *Sextante* dejó de ser un programa independiente y se convirtió en una extensión con una amplia biblioteca de funciones ráster y vectoriales, disponibles para programas como *gvSIG*, *Kosmo* y *OpenJUMP*. *Sextante* ofrece dos herramientas que no existen en *gvSIG*: un gestor de procesos por lotes y un modelador gráfico. El modelador permite crear, editar y guardar secuencias de operaciones automáticas, mientras que el gestor de procesos por lotes ejecuta repetidamente funciones sobre grupos de capas. La última versión estable de *Sextante* es la 0.6; entre sus mejoras más destacadas se encuentra la integración con GRASS 6.4 (Olaya, 2010).

2.3. Métodos para obtener redes viales

De acuerdo con Cores *et al.* (s.f.:2), las principales técnicas usadas para crear redes viales a partir de capas en formato vectorial son tres: la teselación de Voronoi, la triangulación de Delaunay y la interpolación por vecino más cercano. La primera se encuentra detalladamente explicada, tanto operativa como gráficamente, en Gómez (2007); sobre la segunda sólo se encontraron dos referencias: el método propuesto por una de ellas (Amado, 2010) todavía se encuentra en etapa de desarrollo, mientras que en la otra (Cores *et al.*, s.f.) se utiliza un lenguaje de programación, pero no se indica cuál. Sobre la tercera técnica no se encontró documentación alguna. El presente trabajo tiene como objetivo hacer una contribución al respecto.

2.4. Interpolación por vecino más cercano (IVC)

Si se toma una muestra de puntos de un plano, un polígono de Voronoi (conocido también como polígono de Thiessen) se compone de todos los puntos del plano que están más cerca a uno de los puntos de la muestra que a cualquier otro. El conjunto de polígonos de Voronoi para una muestra de puntos es lo que se denomina diagrama de Voronoi, cuyo procedimiento de creación se resume así: a) cada punto se une mediante segmentos de recta con su vecino más cercano

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

(triangulación de Delaunay); b) se construyen las mediatrices de los segmentos creados; c) se unen las mediatrices para formar polígonos que delimitan el área de influencia de cada punto.

Entre las propiedades más importantes del diagrama de Voronoi están que es ilimitado (Esperança y Roma, s.f.) y que es único (Sharifzadeh, 2007). Para una exposición más amplia sobre el tema se puede consultar a Suárez (2001) y Roberts *et al.* (2005). La [figura 1](#) muestra el diagrama de Voronoi y la interpolación por vecino más cercano para una muestra de nueve puntos. La interpolación por vecino más cercano crea un diagrama de Voronoi en formato ráster. El método implementado se basa en dicha interpolación, realizada sobre las capas que contienen las manzanas de la zona de interés.

3. Metodología

Con base en la consulta bibliográfica, se definieron las operaciones que serían requeridas para implementar el método IVC. A partir de dichas operaciones se diseñaron los modelos matemáticos y cartográficos correspondientes. Después, se adecuaron los sistemas operativos y los programas necesarios, se elaboraron cuatro zonas artificiales de prueba y se utilizó el método propuesto para crear la red vial en cada una de ellas. A continuación, se evaluó el rendimiento alcanzado por el método en cada sistema operativo y se compararon sus resultados frente a los obtenidos mediante digitalización manual. Finalmente, se construyó la red de una pequeña zona de la ciudad de Montevideo con el fin de analizar los resultados que pueden obtenerse con el método IVC en una capa con características reales.

3.1. Consulta bibliográfica

Se buscó documentación en cuatro idiomas sobre métodos para la creación de redes viales mediante teselación de Voronoi, triangulación de Delaunay e interpolación por vecino más cercano, utilizando cuatro motores de búsqueda. En el [apéndice 1](#) se muestran las palabras clave utilizadas y en el [apéndice 2](#) los resultados de la consulta, discriminados según idioma y motor de búsqueda. El 95% de los métodos hallados trabaja sobre capas ráster y solamente el 5% lo hace sobre capas vectoriales.

3.2. Herramientas informáticas

Se utilizó un equipo con procesador doble núcleo AMD Ahtlon 64 X2 4400+, velocidad de 2.31 GHz y 1.75 GB de memoria RAM. Los sistemas operativos libres empleados fueron *Ubuntu* (Ub), *Fedora* (Fd), *openSUSE* (oS) y *Linux Mint* (LM). Los sistemas privativos usados fueron *Windows XP* y *Windows 7*. Para implementar el método IVC se usó *gvSIG* en su versión OADE 2010 beta, junto con las extensiones *NavTable* 0.6 y *Sextante* 0.55. Las labores complementarias se realizaron con los siguientes programas: *OpenOffice Writer* (procesador de texto), *OpenOffice Calc*

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

(hojas de cálculo), *OpenOffice Draw* (gráficos), *Mozilla Firefox 3.5* y *GoogleChrome 2.0* (Internet), *Gretl 1.9.1* (estadística) y *GIMP 2.4* (edición de imágenes).

3.3. Zonas de prueba

Para las zonas de prueba artificiales se utilizó el sistema de referencia de coordenadas MAGNA-SIRGAS (IGAC, 2004). Se crearon manzanas rectangulares de 80 m por 100 m, con un ancho de vía de 10 m, separadores de 3 m por 430 m y una inclinación de 45° ([figura 2](#)). A cada manzana se le asignó un código identificador. Para cada una de las cuatro zonas de prueba se definió una cantidad diferente de manzanas con el fin de investigar la variación del tiempo total de proceso según dicho parámetro.

La zona definida para analizar el rendimiento del método en un contexto real está ubicada al sur de la ciudad de Montevideo ([figura 3](#)) y se encuentra en el sistema de referencia UTM zona 21 sur. El sector fue elegido buscando variedad en la geometría y tamaño de las manzanas y de las calles; está compuesto por 151 manzanas, aproximadamente la mitad de las cuales son cuadradas, con cerca de 86 m de lado, mientras que las demás tienen formas rectangulares y triangulares. La separación media entre manzanas es de 15 m y la inclinación general de la base de las manzanas es de aproximadamente 5° con respecto a la horizontal. Hay cuatro calles diagonales principales (25 m de ancho) y cuatro secundarias (9 m de ancho), así como tres callejones sin salida de diferentes tamaños y tres plazuelas cuadradas con cerca de 120 m de lado.

3.4. Implementación y evaluación

Se diseñaron dos modelos matemáticos y cartográficos, uno para la preparación de las capas de entrada y otro para el método IVC. En la [figura 4](#) se presentan los modelos citados.

Además de la preparación de la capa de entrada (opcional), el método IVC se compone de cinco etapas: 1) interpolación; 2) vectorización; 3) transformación de polígonos a líneas; 4) limpieza de nodos y 5) corrección final. Durante la preparación, la capa de entrada se convierte en líneas o puntos equiespaciados y se delimita la zona de estudio. En la primera etapa se realiza la interpolación sobre la capa de líneas (o puntos), lo que genera una capa ráster. En la segunda etapa la capa ráster se convierte en vectorial de tipo polígono. En la tercera etapa los polígonos obtenidos se transforman en líneas. En la cuarta etapa se eliminan los nodos superfluos. En la quinta y última etapa se corrige topológicamente la red obtenida.

Durante la evaluación del método se tuvieron en cuenta tres aspectos: su funcionamiento en cada sistema operativo; la relación entre la cantidad de manzanas tratadas y el tiempo total de proceso y su eficiencia frente a la digitalización manual. Con el fin de analizar el primer y segundo aspecto, se registró el tiempo empleado para obtener la red de cada zona en los diferentes sistemas operativos.

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

La comparación con la digitalización manual se realizó mediante ocho medidas estadísticas: recuento, media, mediana, máximo, mínimo, rango, desviación estándar y coeficiente de variación. Dichas medidas se calcularon independientemente para cada uno de los dos tramos de red correspondientes a los dos lados de las manzanas definidas en las capas de prueba, cuyas longitudes se conocen exactamente: 90 m y 110 m, respectivamente. Para estudiar la distribución estadística de las longitudes de los tramos en cuestión, se utilizaron los correspondientes histogramas de frecuencias.

Cabe anotar que la digitalización manual no se realizó tramo a tramo, para no comparar el método IVC con un procedimiento poco eficiente y generar así una falsa noción de buen funcionamiento. En vez de eso, la digitalización se llevó a cabo mediante el trazado de *polilíneas* independientes, que luego fueron tratadas para generar los tramos individuales requeridos.

4. Descripción y análisis de resultados

Primero, se analizó el rendimiento del método en cada sistema operativo, la duración de cada etapa del mismo y la relación entre la cantidad de manzanas tratadas y el tiempo total de proceso. Luego, se comparó la eficiencia frente a la digitalización manual de la red, sobre el sistema operativo con mejores resultados, y se analizaron los tipos de errores obtenidos. Por último, se estudiaron los resultados alcanzados en la zona de prueba de Montevideo.

4.1. Comparación según sistema operativo

En la [figura 5](#) se observa un gráfico de barras que facilita la comparación del tiempo empleado por cada sistema operativo. La tendencia en cada una de las zonas de prueba es muy similar, con una mayor eficiencia de *Linux Mint*, *Ubuntu* y *XP*, seguidos de cerca por *Fedora* y *openSUSE*. Solamente *Windows 7* presenta un resultado mucho menos eficiente que los demás sistemas, por un factor cercano a tres.

En cuanto a la duración de cada una de las cinco etapas del método IVC implementado sobre el sistema más eficiente (*Linux Mint*), se observó que la tercera de ellas, correspondiente a la transformación de los polígonos en líneas, es la que representa un menor porcentaje del tiempo de proceso, mientras que la última etapa, correspondiente a la corrección final de la red, representa el mayor porcentaje, entre el 50% y el 60% del total.

En lo que se refiere a la tendencia del tiempo empleado por el método, en función del número de manzanas procesadas según los diferentes sistemas usados, se verificó que presenta un comportamiento muy cercano al de una función cuadrática. Por su parte, el tiempo empleado por la digitalización manual mantiene una relación prácticamente lineal con el número de manzanas tratadas. Esta tendencia podría ser debida a la cantidad relativamente baja de tramos digitalizados y la reducida duración de la labor, cercana a 20 minutos. Es de esperar que, a medida que aumenta el

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

tiempo de trabajo, se presente una caída en el rendimiento de la digitalización desarrollada por el operario.

4.2. Comparación frente a digitalización manual

En la [tabla 1](#) se comparan las medidas estadísticas calculadas para la longitud de cada uno de los tramos definidos (90 m y 110 m) elaborados mediante la digitalización manual (M), frente a los obtenidos a través del método IVC, ambos sobre *Linux Mint*.

En la [figura 6](#) se aprecian los histogramas de las longitudes obtenidas para los tramos de 90 m y 110 m, respectivamente. Los valores del eje Y coinciden exactamente entre las figuras de cada fila, además se han omitido la mayoría de los valores en los dos ejes para facilitar la lectura. Todos los histogramas tienen la misma escala, tanto en el eje X (longitud de tramo en metros) como en el eje Y (frecuencia relativa). La digitalización manual presenta una distribución cercana a la normal y es muy similar en los dos tramos de todas las zonas de prueba. Por su parte, el método IVC exhibe una distribución mucho más dispersa, especialmente en los tramos de 90 m. Dos histogramas del IVC exhiben un comportamiento atípico: en el tramo de 90 m, zona 2, se presenta una dispersión mayor a los demás; en el tramo de 110 m, zona 4, se presenta una dispersión prácticamente igual a la de la zona 3. Lo anterior, muy probablemente, fue ocasionado por el factor humano asociado a la edición manual en la etapa final del proceso. Dicho factor podría generar caídas en la calidad de los resultados, como ocurre en la primera de las anomalías citadas, o un aumento en la misma, como sucede en la segunda.

En la [figura 7](#) se presenta la red obtenida en la zona artificial 4 antes de la última etapa del método, correspondiente a la corrección topológica manual, junto con los errores resultantes. Se presentaron dos tipos de errores: en el error tipo 1 ([figura 7](#), detalle A), el método traza ejes por encima de las manzanas. En el error tipo 2, se generan tramos innecesarios, ya sea tramos superfluos ([figura 7](#), detalle B) o tramos duplicados ([figura 7](#), detalle C).

4.3. Aplicación

En la [figura 8](#) se aprecia la red obtenida en la zona de prueba de Montevideo antes de la corrección topológica final. Resulta interesante la calidad de los resultados obtenidos, especialmente en las manzanas cuadradas y rectangulares, así como el tiempo relativamente corto empleado, menor de 5 minutos para 151 manzanas; la mitad de este tiempo fue empleada en la preparación de la capa de entrada. En la red obtenida se presentaron los mismos errores que en las zonas de prueba artificiales: en el error tipo 1 ([figura 8](#), detalle A), se trazan ejes por encima de las manzanas, y en el error tipo 2 ([figura 8](#), detalle B), se generan tramos superfluos, ya sea donde convergen calles diagonales o donde se encuentran calles con diferente ancho de vía. Además, se generaron dos errores tipo adicionales: en el tipo 3, se dejan de construir los tramos correspondientes a calles rodeadas por manzanas con el mismo código de identificación ([figura 8](#),

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

detalle C), mientras que en el tipo 4 ([figura 8](#), detalle D), se trazan ejes sin tener en cuenta la configuración de espacios abiertos, tales como plazoletas o parques.

5. Conclusión

Mediante el presente trabajo se ha comprobado la aplicación que tienen *gvSIG* y *Sextante* en el campo de la generación de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales. El método IVC resulta tan eficiente como la digitalización manual tramo a tramo, sin embargo, es menos eficiente que la digitalización optimizada. Para mejorar el rendimiento del método propuesto se podría utilizar la extensión de correcciones topológicas de *gvSIG*, cuando sea lanzada una versión estable. Se verificó que la forma en que aumenta el tiempo de proceso frente al número de manzanas procesadas se ajusta a un modelo cuadrático. Por esta razón, en caso de trabajar con capas de tamaño considerable, resulta más eficiente dividir las subzonas y aplicar el método en cada una de ellas por separado. Los programas libres proponen una manera de desarrollar el conocimiento técnico y científico donde los usuarios de las herramientas propuestas se convierten en protagonistas activos. Por lo tanto, queda abierta la invitación para que la comunidad evalúe el presente trabajo, realice los comentarios que considere pertinentes y contribuya a optimizar el método puesto a su consideración.

Agradecimientos

A la oficina del Sector de Información Geográfica de la Intendencia Municipal de Montevideo, por autorizar la utilización de la cartografía digital de dicha ciudad. Igualmente, a las señoritas Christina Hackl, por su confianza y patrocinio, y Andrea Mariño, por su invaluable apoyo.

Referencias bibliográficas

- Acevedo, V. (2010): *Guía de usuario extensión de topología de gvSIG*. [Consulta: 15-05-2010]. Disponible en: <https://gvSIG.org/web/projects/gvsig-desktop/docs/user/ext/topologia/topologia-0-1.0>
- Agazzi, V. (2010): "gvSIG: Mobile, Mini, PhoneCache". *1as Jornadas Brasileiras de gvSIG*. Curitiba, Brasil: 22-24 de septiembre de 2010. [Consulta: 15-05-2010]. Disponible en: http://gvSIG-desktop.forge.osor.eu/downloads/pub/events/jornadas-Brasileiras/2010/reports/gvSIG_Mobile_Mini_PhoneCache.pdf
- Amado Barón, E. A. (2010): "Método semiautomático para la creación de redes viales planas mediante gvSIG y Sextante". *2as Jornadas de Latinoamérica y el Caribe de usuarios de gvSIG*. Caracas, Venezuela: 14-16 de julio de 2010. [Consulta: 10-08-2010]. Disponible en: <http://gvSIG-desktop.forge.osor.eu/downloads/pub/events/jornadas-lac/2as-jornadas-lac/articles/Articulo-Metodo-semiautomatico-redes-viales-planas.pdf>
- Amberg, V. (2005): *Analyse de scènes péri-urbaines à partir d'images radar haute resolution: Application à l'extraction semi-automatique du réseau routier*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000291/01/amberg1.pdf>

Amado Barón, E.A. (2011): “Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales”, *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

- Anguix Alfaro, A. (2005): “gvSIG: soluciones de código abierto para las tecnologías espaciales”, *GeoFocus*, 5, pp. 38-42. [Consulta: 06-01-2009]. Disponible en: http://geofocus.rediris.es/2005/Informe4_2005.pdf
- Anil, P. N. y Natarajan, S. (2010): “Automatic road extraction from high resolution imagery based on statistical region merging and skeletonization”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2, 3, pp. 165-171. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://www.ijest.info/docs/IJEST10-02-03-08.pdf>.
- Barrientos, M. A. (2007): *Network Analyst: el analista de redes desde ArcGIS 9.2* [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://www.gabrielortiz.com/descargas/Network_Analyst_9_2.pdf.
- Bendouda, M. y Berrached, N. E. (2009): *Conception d'un système d'information géographique pour la gestion du réseau routier Urbain*. [Consulta: 12-04-2010]. Disponible en: http://www.reseautd.cict.fr/alger/Articles_PDF_apres_correction_et_evaluation/A05_bendouda_JA_S09.pdf
- Bonnefon, R. (s.f.): *Extraction d'objets cartographiques à partir d'images de télédétection : possibilité d'application à la mise à jour de Systèmes d'Information Géographique*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://www.irit.fr/ACTIVITES/EQ_TCI/EQUIPE/bonnefon/these.pdf.
- Caliper (2010): *Versiones de TransCad*. [Consulta: 10-05-2010]. Disponible en: <http://www.caliper.com/TransCAD/versiones.htm>.
- Carrión Rico, G. et al. (2008): “gvSIG: Informe de estado”. *II Jornadas de SIG libre*. Girona, España: 3-5 de marzo de 2008. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://dugi-doc.udg.edu/bitstream/10256/1140/1/gvSIGCarrion_Art.pdf
- CIT (2008): *gvSIG: prototipo de metadatos v. 1.0*. Conselleria d'Infraestructures i Transport, Generalitat Valenciana. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://forge.osor.eu/docman/view.php/172/368/gvsig-1_1_x-Metadatos_prototype-man-v1-es.pdf
- Cores, F. et al. (s.f.): *Generación automática de redes de transporte a través de datos cartográficos*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://www.esi2.us.es/GT/docs/cit2008_cores.pdf.
- Esperança, C. y Roma, P. (s.f.): *Geometria Computacional: Triangulações*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://orion.lcg.ufri.br/gc/download/Triangulacoes.pdf>
- Estévez, J. et al., 2010: *Manual Básico de NavTable*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://navtable.forge.osor.eu/>
- García, 2010: “DielmoOpenLiDAR: Análisis de datos LiDAR sobre gvSIG”. *4as Jornadas Internacionales de gvSIG*. Valencia, España: 3-5 de diciembre de 2008. [Consulta: 13-04-2010]. Disponible en: <http://gvsig-desktop.forge.osor.eu/downloads/pub/events/gvSIG-Conference/4th-gvSIG-Conference/Articles/DielmoOpenLiDAR.pdf>
- Gold, C. y Snoeyink, J. (s.f.): *A one-step crust and skeleton extraction algorithm*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.1.2568>
- Gómez, E. (2007): Voronoi centrelines skeleton. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Voronoi_centerlines_skeleton.gif
- Gonçalves, T. y dal Poz, A. (2001): *Extração semi-automática de rodovias combinando um modelo de trajetória com uma estratégia de correlação*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://www.dpi.inpe.br/geoinfo/geoinfo2002/papers/Sussel.pdf>

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

- Google (2010): *Guía del usuario de Google Maps*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://maps.google.com/support/bin/static.py?hl=es&page=guide.cs&guide=21670&from=21670&rd=1>
- gvSIG (2009): *Manual de usuario de la extensión de redes gvSIG 1.9*. [Consulta: 10-06-2010]. Disponible en: <http://jornadas.gvsig.org/docusr/redes-userguide>
- Higón, J. V. y Anguix Alfaro, A. (2009): *Avances en la extensión de publicación de servicios OGC en el SIG libre gvSIG*. [Consulta: 10-06-2010]. Disponible en: <http://orzancongres.com/JIDEE09/53.pdf>
- IGAC (2004): *Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA-SIRGAS como datum oficial de Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. [Consulta: 11-04-2010]. Disponible en: <http://190.14.251.83/?q=node/117>
- Kareaga, I. (2008): *Extensión para redes hídricas*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://www.gvsig.org/web/plugins/Members/ikareaga/ManualUsuario.pdf>
- Koutaki, G. y Uchimura, K. (2003): *Automatic road extraction based on cross detection in suburb*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://navi.cs.kumamoto-u.ac.jp/english/publications/pdf/int_thesis/2004-02.pdf
- Mena, J. (2003): "State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification", *Pattern Recognition Letters*, 24, pp. 3037-3058. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://www2.uah.es/juan_mena/Publicaciones/State_of_the_art_PATREC.pdf
- Montesinos Lajara, M. y Carrasco Marimón, J. (2008): "gvSIG Mobile: gvSIG para dispositivos móviles". *II Jornadas de Software libre*. Girona, España: 3-5 de marzo de 2008. [Consulta: 15-05-2010]. Disponible en: http://dugi-doc.udg.edu/bitstream/10256/1110/9/gvSIG_Art.pdf
- OAI (2010): *gvSIG OA Digital Edition Quickstart Guide*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: ftp://88.208.250.116/gvSIG_OADE_Quickstart.pdf
- Olaya, V. (2010): *Introduction to Sextante*. [Consulta: 12-08-2010]. Disponible en: <http://forge.osor.eu/docman/view.php/13/123/IntroductionToSEXTANTE.pdf>
- OSM (2010): *Página principal Open Street Map en castellano*. [Consulta: 12-08-2010]. Disponible en: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/ES:Main_Page
- Roberts, S. P. et al. (2005): "Street centreline generation with an approximated area Voronoi diagram", En Fisher, P. *Developments in spatial data handling*. New York, Springer. pp. 436-446.
- Rodríguez, A. (2007): "Integración de un SIG con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos CVRP y software de gestión de flotas", *XI Congreso de Ingeniería de Organización*. Madrid, España: 5-7 de septiembre de 2007. [Consulta: 12-04-2010]. Disponible en: http://personalesupv.es/arodrigu/IDI/CIO_2007_RodriguezA.pdf
- Roux, M. et al. (s.f.): *Recalage image SPOT/ carte routière*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://www.isprs.org/proceedings/XXIX/congress/part3/384_XXIX-part3.pdf
- Ruskoné, R. (1996): *Extraction automatique du réseau routier par interprétation locale du contexte : application à la production de données cartographiques*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: http://recherche.ign.fr/labos/matis/pdf/theses/these_ruskone.pdf
- Sharifzadeh, M. (2007): *Spatial query processing using Voronoi diagrams*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://digitallibrary.usc.edu/assetserver/controller/view/search/etd-Sharifzadeh-20070416>

Amado Barón, E.A. (2011): “Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales”, *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

Soria, A. y Brodin, I. (2009): “Extensión de topografía para gvSIG v. 2.0”. *5as Jornadas Internacionales de gvSIG*. Valencia, España: 2-4 de diciembre de 2009. [Consulta: 10-09-2010]. Disponible en:

http://gvsig-desktop.forge.osor.eu/downloads/pub/events/gvSIG-Conference/5th-gvSIG-Conference/Reports/Taller_gvSIG_Ingenieria_civil.pdf

Stallman, R. (2004): *Software libre para una sociedad libre*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en: <http://biblioweb.sindominio.net/pensamiento/softlibre/softlibre.pdf>

Suárez Rivero, J. P. (2001): *Estructuras de datos tipo grafo en los algoritmos de refinamiento y desrefinamiento basados en la bisección por el lado mayor: aplicaciones*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en:

<http://bdigital.ulpgc.es/digital/visualizar/propiedad.php?accion=tesis&id=234&vol=no>

Torres, J. et al. (2008): “Representación vectorial 3D en un sistema de información geográfica”. *Conferencia Española de Computación Gráfica 2008*. Barcelona, España: 3-5 de septiembre de 2008. [Consulta: 10-09-2010]. Disponible en: <http://www.upv.es/upl/U0433586.pdf>

Ubeda, M. (2008): *Herramienta de análisis de redes en un sistema de información geográfica*. [Consulta: 09-04-2010]. Disponible en: https://forxa.mancomun.org/frs/?group_id=71

Wang, R. et al. (s.f.): *Extraction of road networks using pan-sharpened multispectral and panchromatic QuickBird images*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en:

<http://www.cim.mcgill.ca/~ruisheng/software/GeomaticaAccepted.pdf>

Wiedemann, C. et al. (s.f.): *Automatic extraction and evaluation of road networks from MOMS-2P imagery*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.48.5837>

Yuan, J. et al. (s.f.): *Automatic road extraction from satellite imagery using LEGION networks*. [Consulta 10-04-2010]. Disponible en:

<http://www.cse.ohio-state.edu/~dwang/papers/YWWYL.ijcnn09.pdf>

Zanin, R. (2004): *Metodologia automática para extração de cruzamentos de rodovias em imagens de alta resolução*. [Consulta: 10-04-2010]. Disponible en:

http://www4.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_zanin_rb.pdf

Zhang, Q. y Couloigner, I. (2006): *Automatic road change detection and GIS updating from high spatial remotely-sensed imagery*. [Consulta: 05-06-2010]. Disponible en:

http://www.hku.hk/dupad/asiagis/fall03/Full_Paper/Zhang_Qiaoping.pdf

Zhu, Q. y Mordohai, P. (s.f.): *A minimum cover approach for extracting the road network from airborne LIDAR data*. [Consulta: 06-05-2010]. Disponible en:

http://www.cs.stevens.edu/~mordohai/public/Zhu_MinCoverRoadsLidar09.pdf

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

TABLAS

Tabla 1. Estadísticas para las longitudes de los tramos considerados.

Tramo	Medida	Método (Zona)							
		M (1)	IVC (1)	M (2)	IVC (2)	M (3)	IVC (3)	M (4)	IVC (4)
90m	Recuento	48	48	88	88	136	136	176	176
	Media	89 ,94	90 ,56	90 ,03	90 ,83	90 ,03	90 ,82	90 ,13	90 ,79
	Mediana	90 ,25	90 ,56	90 ,00	90 ,59	90 ,23	90 ,79	90 ,36	90 ,62
	Máximo	90 ,79	92 ,79	92 ,28	99 ,09	91 ,95	94 ,92	93 ,32	97 ,63
	Mínimo	88 ,70	87 ,43	88 ,29	83 ,63	86 ,90	84 ,51	87 ,42	84 ,94
	Rango	2 ,09	5 ,35	3 ,99	15 ,47	5 ,05	10 ,41	5 ,90	12 ,69
	Desv. estándar	0 ,57	1 ,20	0 ,72	1 ,88	0 ,86	1 ,80	1 ,19	1 ,48
	Coefficiente de variación	0 ,006	0 ,016	0 ,008	0 ,021	0 ,010	0 ,019	0 ,013	0 ,016
110m	Recuento	45	45	86	86	129	129	172	172
	Media	109 ,86	109 ,42	110 ,12	110 ,06	110 ,17	110 ,26	110 ,25	110 ,15
	Mediana	109 ,96	108 ,89	109 ,95	108 ,89	110 ,28	108 ,89	110 ,20	108 ,89
	Máximo	111 ,52	114 ,82	111 ,65	116 ,20	113 ,07	118 ,79	115 ,36	118 ,79
	Mínimo	107 ,90	105 ,80	108 ,24	104 ,37	108 ,06	102 ,55	106 ,52	104 ,39
	Rango	3 ,63	9 ,02	3 ,42	11 ,83	5 ,01	16 ,24	8 ,84	14 ,41
	Desv. estándar	0 ,75	2 ,37	0 ,78	2 ,94	0 ,99	3 ,35	1 ,27	2 ,79
	Coefficiente de Variación	0 ,007	0 ,022	0 ,007	0 ,027	0 ,009	0 ,030	0 ,011	0 ,025

Fuente. Elaboración propia

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

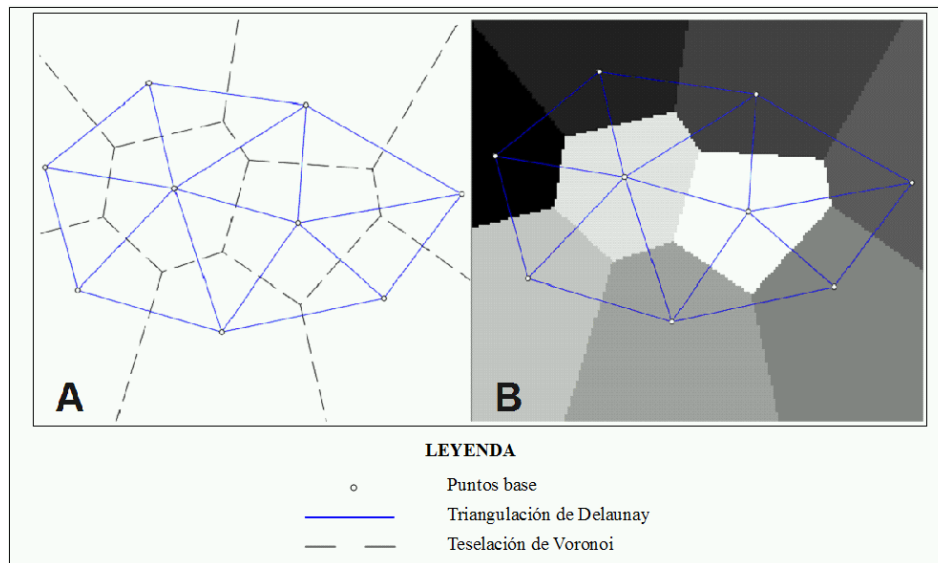


Figura 1. Relación entre la triangulación de Delaunay, el diagrama de Voronoi y la interpolación por vecino más cercano para una muestra de nueve puntos:
A. diagrama de Voronoi; B. interpolación por vecino más cercano.

Fuente. Elaboración propia.

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

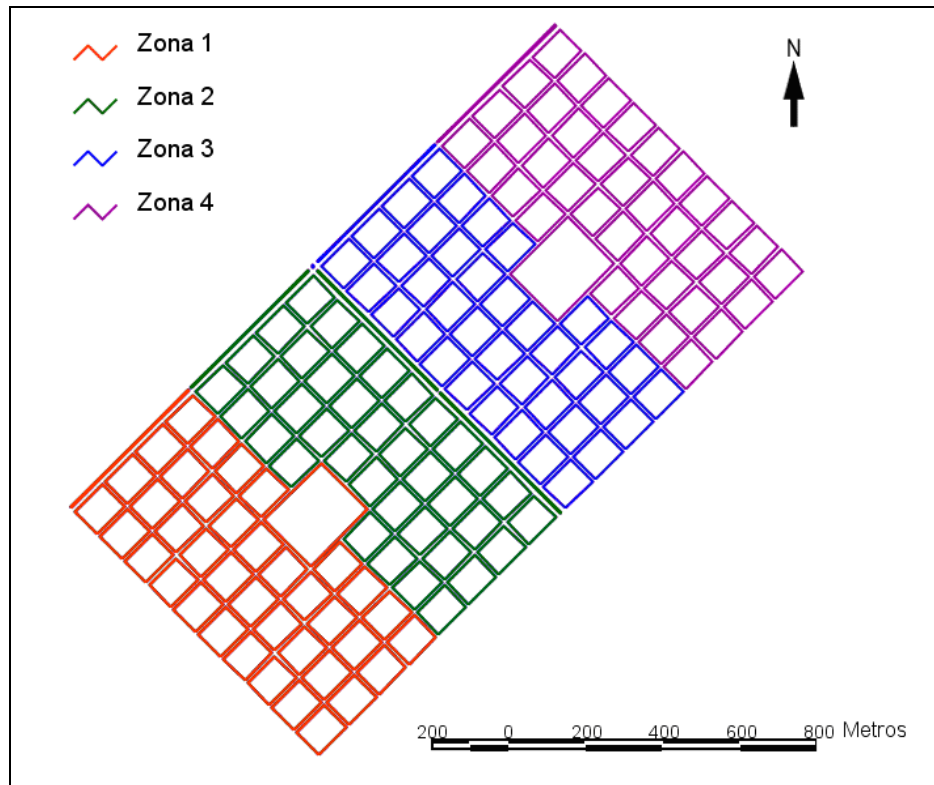


Figura 2. Zonas de prueba artificiales. Todas tienen origen en el vértice inferior y están ubicadas una detrás de la otra, desde la zona 1 hasta la zona 4.

Fuente. Elaboración propia.

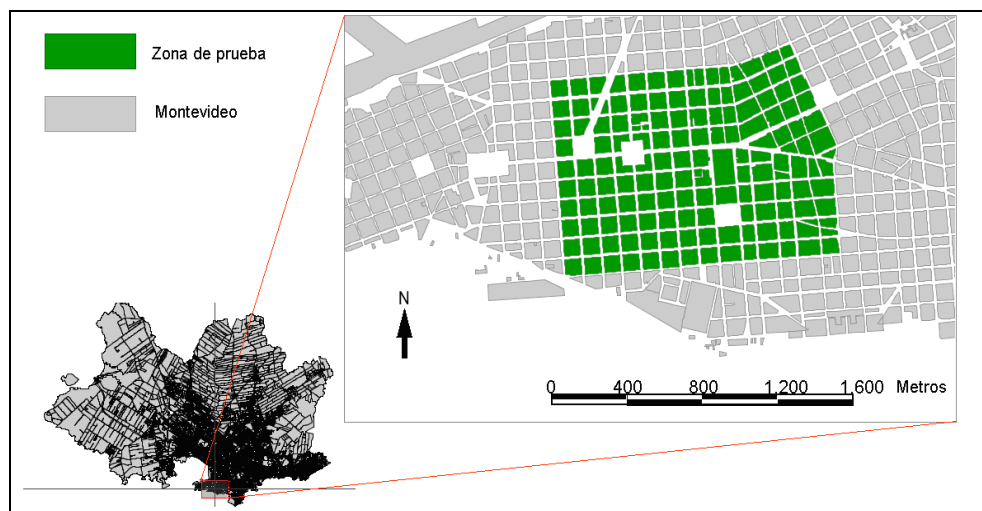
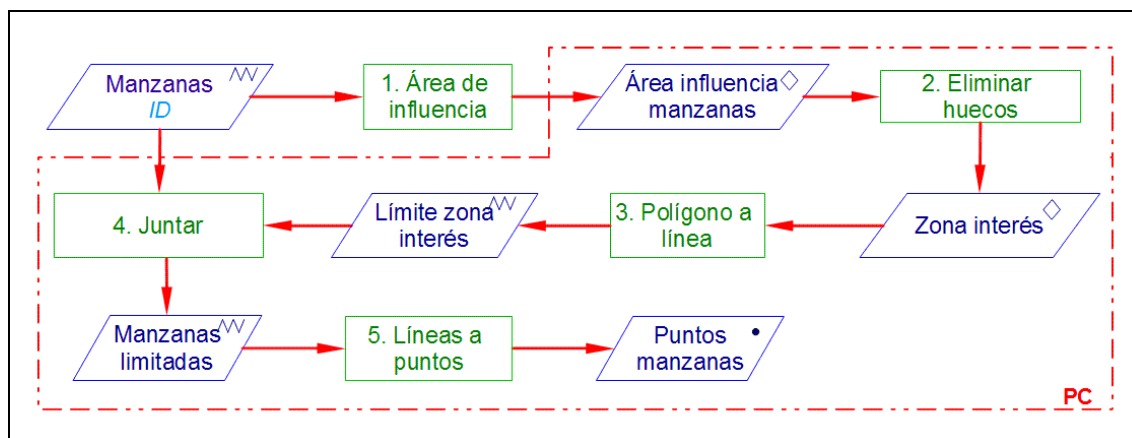


Figura 3. Localización de la zona de prueba dentro de la ciudad de Montevideo.

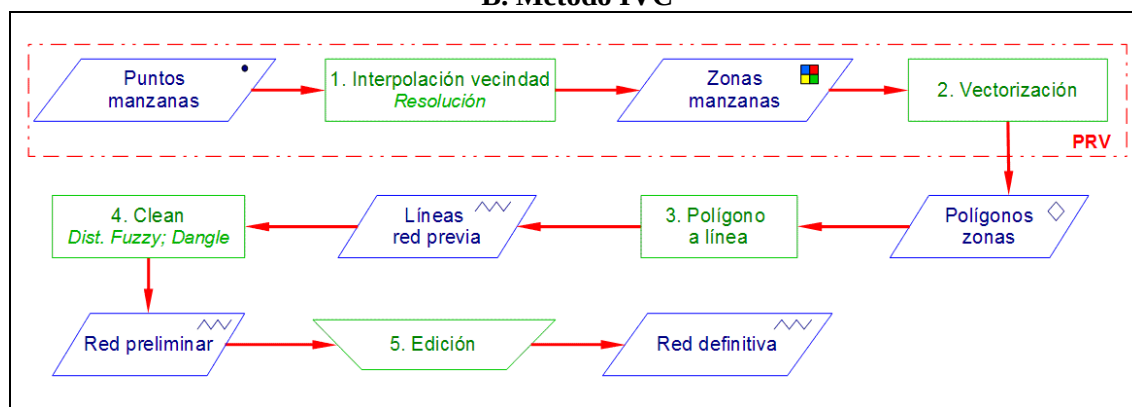
A. Preparación de capas

Fuente. Elaboración propia.

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157



B. Método IVC



Leyenda

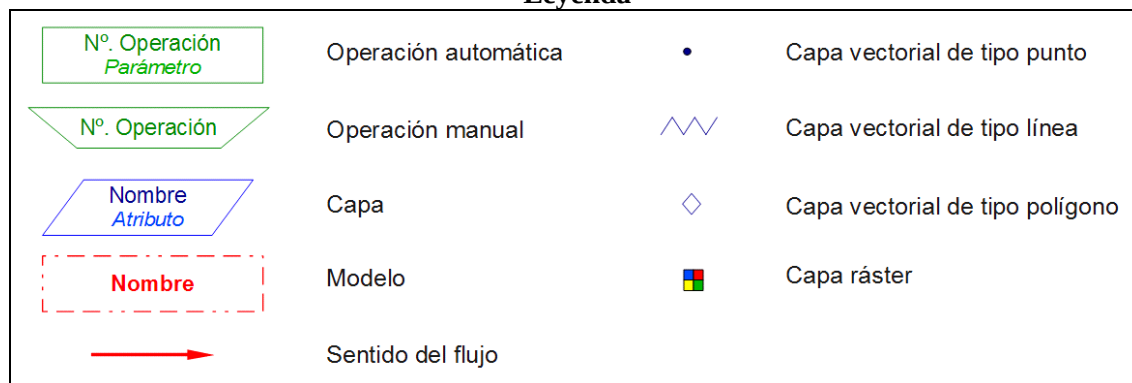


Figura 4. Modelos matemáticos y cartográficos. Las operaciones dentro de la línea punteada se incluyeron en modelos automatizados mediante Sextante.

Fuente. Elaboración propia.

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

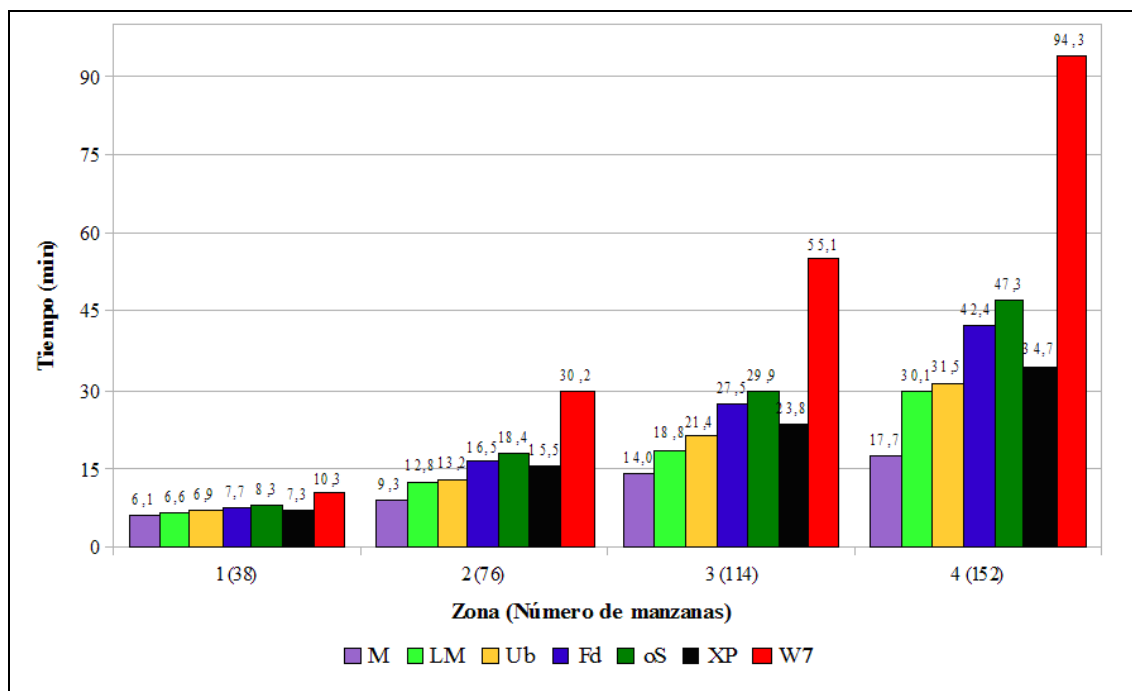


Figura 5. Rendimiento del método IVC frente a digitalización manual (M), según sistema operativo y cantidad de manzanas operadas.

Fuente. Elaboración propia.

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

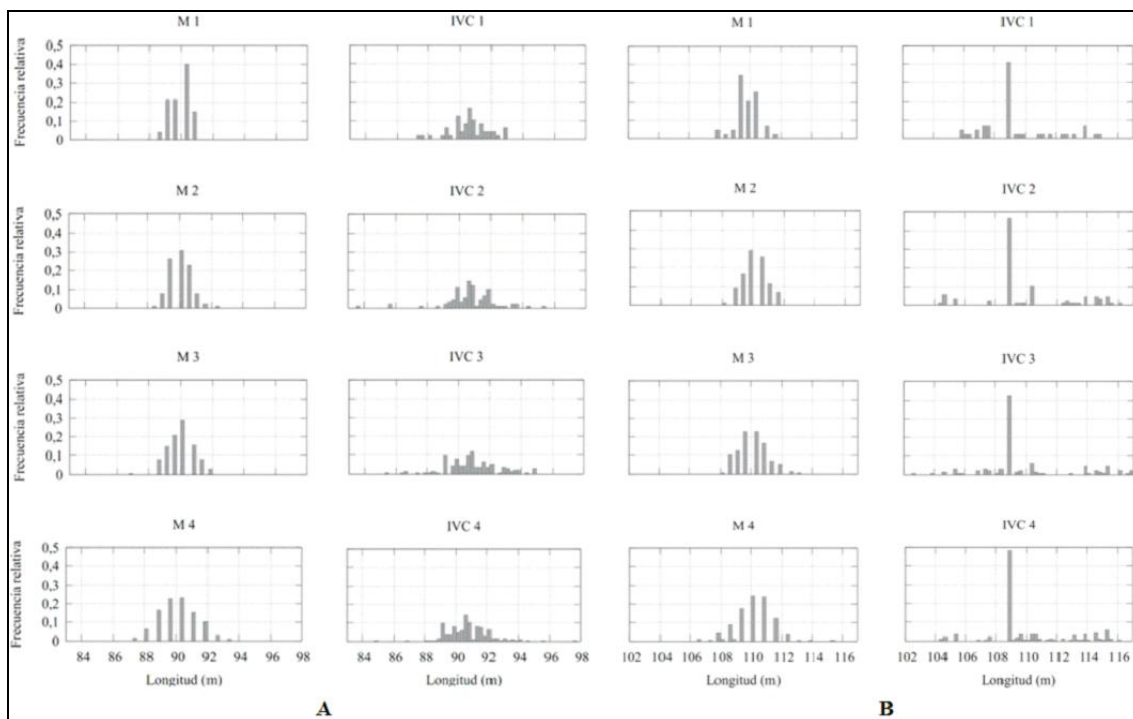


Figura 6. Histogramas de longitudes para cada tramo: A. Tramo 90 m. B. Tramo 110 m.
Los números corresponden a cada una de las cuatro zonas de prueba.
Los dos ejes de todas las gráficas tienen la misma escala.

Fuente. Elaboración propia

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

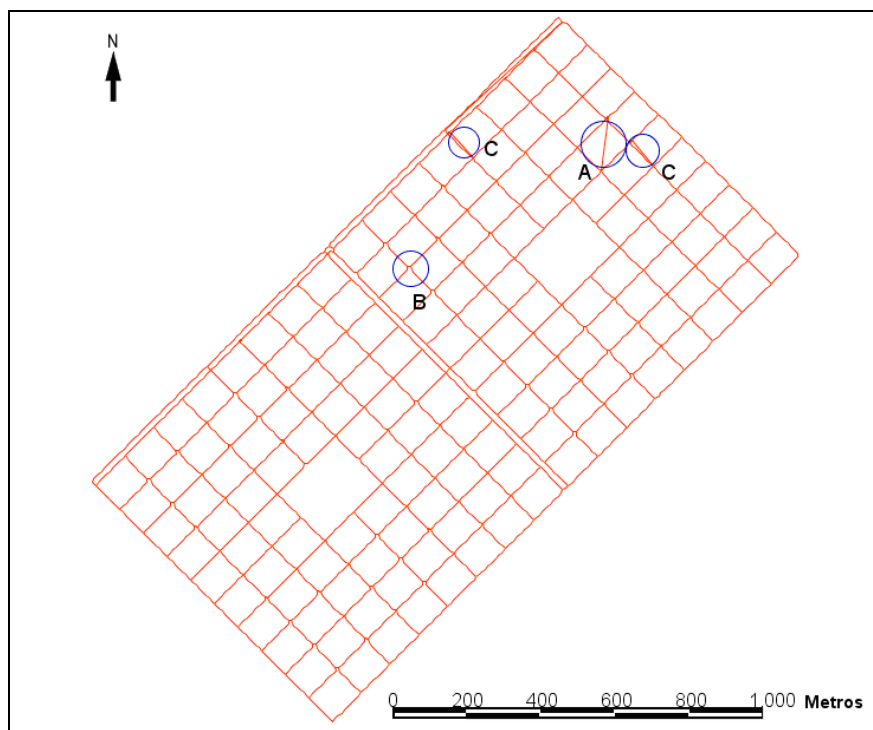


Figura 7. Red y errores zona artificial 4: error tipo 1: tramos sobre manzanas (A); error tipo 2: tramos superfluos (B) y tramos duplicados (C).

Fuente. Elaboración propia.

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

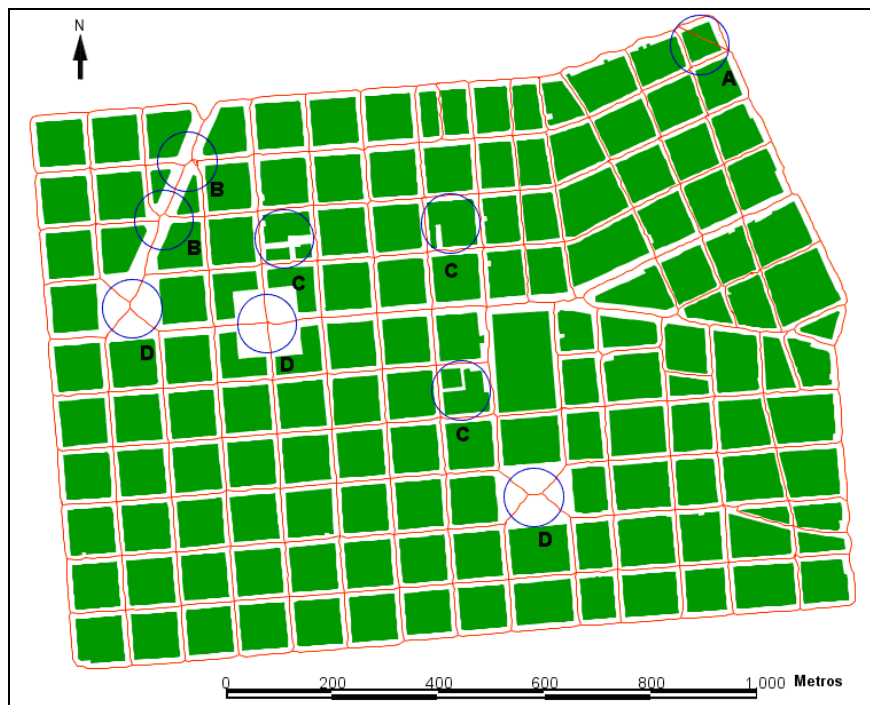


Figura 8. Red obtenida (en rojo) y errores tipo zona Montevideo: Tipo 1, tramos sobre manzanas (A); Tipo 2, tramos superfluos (B); Tipo 3, supresión tramos interiores (C); Tipo 4, interpretación errada de espacios abiertos (D).

Fuente. Elaboración propia.

Amado Barón, E.A. (2011): "Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

APÉNDICES

Apéndice 1. Palabras clave consulta bibliográfica

Idioma	NIVEL				
	1	2	3	4	5
Castellano	método	construcción obtención extracción creación	redes viales	SIG	Voronoi Delaunay
Inglés	method	building extraction construction	road networks	GIS	Voronoi Delaunay
Portugués	método	construção extração criação	redes rodovias redes de estradas	SIG GIS	Voronoi Delaunay
Francés	méthode	construction extraction création	réseaux routiers	SIG	Voronoi Delaunay

Fuente: elaboración propia

Apéndice 2. Resultados consulta bibliográfica

Idioma	NÚMERO DE DOCUMENTOS											
	Resultados iniciales				Revisados				Consultados			
	GBA	GA	GL	SD	GBA	GA	GL	SD	GBA	GA	GL	SD
Castellano	263	63	-	-	25	36	-	-	-	5	-	-
Inglés	2.422	5.141	173	245	122	81	21	46	1	18	1	1
Portugués	72	308	1	3	36	42	-	2	-	5	-	-
Francés	63	145	-	-	30	8	-	-	-	6	-	-
L*	15	12	3	5	12	3	5	10	-	1	-	1
Total MB**	2.835	5.669	177	253	225	170	26	58	1	35	1	1
Total	8.934				479				38			

L*: búsqueda libre, siguiendo referencias bibliográficas de documentos relevantes consultados.

MB**: motor de búsqueda

Fuente: elaboración propia

¹ Un método para la extracción de redes viales en zonas urbanas, a partir de capas ráster, se puede consultar en el trabajo de Bendouda y Berrached (2009), referido en la bibliografía.

² Con este principio se busca garantizar la verificabilidad de las fuentes usadas, aspecto omitido demasiado a menudo por la literatura científica. El autor ha comprobado, no obstante, que es frecuente la desaparición de sitios *web* de donde se han obtenido documentos de referencia; siempre que los derechos de autor sobre dichos textos lo permitan, el autor está dispuesto a compartirlos mediante correo electrónico con quien exprese su interés en ello.

Amado Barón, E.A. (2011): “Aplicación de dos programas SIG libres en la obtención de redes viales urbanas a partir de capas vectoriales”, *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 11, p. 16-37. ISSN: 1578-5157

³ El idioma inglés se presta para importantes confusiones sobre el tema: *free* significa tanto libre como gratis, dos conceptos totalmente diferentes en el mundo de los programas libres. Además, existe un movimiento denominado *open source* (código abierto) que, aunque desarrolla proyectos muy compatibles en la práctica con los del *software* libre, no basa su filosofía en la libertad sino en la eficiencia. Al conjunto de programas libres y de código abierto a veces se les denomina como FOSS (*Free and Open Source Software*). Para evitar las citadas confusiones, algunos autores utilizan en inglés las palabras *software libre* para referirse a los programas que permiten ejercer las cuatro libertades fundamentales y tienen su base filosófica en la libertad.

⁴ Para tener una idea general sobre el panorama de las licencias libre más utilizadas, se puede consultar el sitio: http://opensource/licences_summary.html.